

---

Научная статья

УДК 621.315.616.7

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-8-77-87

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В ОБЛАСТИ МОРОЗОСТОЙКИХ РЕЗИН НА ОСНОВЕ ПОЛЯРНЫХ И НЕПОЛЯРНЫХ КАУЧУКОВ (обзор)

Я.А. Вахрушева<sup>1</sup>, О.Б. Юмашев<sup>1</sup>, А.М. Чайкун<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

**Аннотация.** Представлен анализ современных тенденций, необходимых при создании рецептур резиновых смесей для резинотехнических изделий специального назначения, работоспособных в условиях продолжительного воздействия низких температур. Даны основные эксплуатационные характеристики резин на основе полярных и неполярных каучуков. Систематизированы результаты новых исследований ученых НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ по созданию эластомерных материалов для работы в условиях продолжительного воздействия отрицательных температур, описаны особенности создания морозостойких резин и проведен анализ основных вариантов выбора необходимого соотношения каучуков и ингредиентов.

**Ключевые слова:** резины, морозостойкость, озоностойкость, полярные каучуки, неполярные каучуки

**Для цитирования:** Вахрушева Я.А., Юмашев О.Б., Чайкун А.М. Современные тенденции в области морозостойких резин на основе полярных и неполярных каучуков (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 8 (114). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-8-77-87.

Scientific article

## THE BASIC PRINCIPLES OF CREATION OF FORMULA COLD-RESISTANT RUBBERS STOCK FOR THE PRODUCTS MAINTAINED IN THE CONDITIONS OF THE ARCTIC CLIMATE (review)

Ja.A. Vahrusheva<sup>1</sup>, O.B. Yumashev<sup>1</sup>, A.M. Chaykun<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

**Abstract.** The article is devoted to the analysis of current trends necessary in the creation of rubber compound formulations for special-purpose rubber products, operable under conditions of prolonged exposure to low temperatures. The main operational characteristics of rubbers based on polar and non-polar rubbers are given. The results of new research by scientists from the National research center «Kurchatov institute» state research center of the Russian Federation on the creation of elastomeric materials for work under conditions of prolonged exposure to negative temperatures are systematized, the features of creating frost-resistant rubber are described, and an analysis of the main options for choosing the required ratio of rubbers and ingredients is carried out.

**Keywords:** rubber, cold resistance rubber, ozone-resistance rubber, polar rubber, non-polar rubber.

**For citation:** Vahrusheva Ja.A., Yumashev O.B., Chaykun A.M. The basic principles of creation of formula cold-resistant rubbers stock for the products maintained in the conditions of the arctic climate (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 8 (114), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-8-77-87.

### Введение

Интенсификация эксплуатации изделий авиационной промышленности диктует необходимость применения материалов с повышенными техническими характеристиками. Современные тенденции осложнения условий работы всех деталей и узлов авиационного оборудования определяют дополнительные требования к комплектующим материалам. Указанные соображения в полной мере относятся к эластомерным уплотнительным деталям, которые обеспечивают герметичность авиационной техники. Они эксплуатируются в постоянном контакте с жидкими агрессивными рабочими средами, такими как топлива и масла, и длительно работают в условиях воздействия воздушной среды с повышенным содержанием озона [1–5]. К морозостойким относят резины, которые сохраняют способность к высокоэластической деформации при температурах менее  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Важным эксплуатационным свойством материалов также является теплостойкость, характеризующаяся предельной температурой, при которой резина теряет свою механическую прочность при воздействии нагрузки. Эксплуатационные характеристики эластомеров обеспечиваются применяемыми каучуками, ингредиентами и формируемой при вулканизации сетчатой структурой различной природы.

Стойкость к воздействию жидких агрессивных сред, морозо- и теплостойкость резин определяются прежде всего химической природой каучука. Поэтому для создания морозостойких резин авиационного назначения необходимо применение полярных и неполярных каучуков. Каучуки различного химического строения обеспечивают работоспособность резин с учетом разнонаправленного воздействия эксплуатационных факторов. Важно учитывать возможность их совмещения для достижения синергетического эффекта – например, для обеспечения сочетания топливо- и морозостойкости. Необходимы также нетрадиционные решения в области применяемых ингредиентов [6–16].

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

### Принципы создания морозостойких резин

Резина является одним из самых многокомпонентных полимерных материалов. В рецептуру серийно выпускаемых резиновых смесей входят от 6 до 20 ингредиентов, каждый из которых имеет функциональное назначение. Главным является полимерная составляющая, состоящая из одного или нескольких каучуков, и именно она в большей степени определяет свойства резин. Кроме того, к основным ингредиентам резиновых смесей относятся:

- вулканизирующая группа, обеспечивающая сшивание макромолекул каучуков и образование сетчатой структуры вулканизата, состоящая из вулканизирующего агента, ускорителей и активаторов вулканизации;
- активные наполнители, повышающие упруго-прочностные свойства резин, наиболее распространенными из которых являются технический углерод и белая сажа;
- мягчители и пластификаторы. Мягчители являются технологической добавкой, облегчающей переработку резиновой смеси на стадиях смешения и формирования заготовок для вулканизации изделий, а пластификаторы повышают сегментальную подвижность макромолекул каучука и обеспечивают эластичность и морозостойкость резин;
- противостарители, предотвращающие деструкцию макромолекул при переработке и эксплуатации.

Поскольку определяющими морозостойкость резин полимерными материалами являются каучук, пластификаторы, вулканизирующая группа и активные наполнители, далее рассмотрим их влияние на низкотемпературные свойства резин [17–24].

### **Особенности морозостойких резин на основе каучуков различного химического строения**

Морозостойкость резин определяется прежде всего макроструктурой, конфигурацией и конформацией структурных единиц каучука. Указанные факторы обеспечиваются структурой вулканизационной сетки, образующейся при вулканизации каучука.

Важным элементом структуры каучука является химическое строение звеньев, т. е. наличие в основной цепи полимера полярных или неполярных групп. Это определяет в первую очередь его химическую и морозостойкость.

Рассмотрим основные характеристики резин на основе типичных каучуков различного химического строения.

#### **Бутадиен-нитрильные каучуки**

Бутадиен-нитрильные каучуки (БНК) являются продуктом эмульсионной сополимеризации бутадиена и нитрила акриловой кислоты. Морозостойкость БНК и резин на их основе определяется содержанием нитрильных групп в основной цепи полимера, а также выбранной вулканизирующей системой. С увеличением содержания акрилонитрила морозостойкость вулканизатов БНК уменьшается. Это можно объяснить увеличением числа полярных групп, уменьшающих сегментальную подвижность каучука. Чем меньше температура стеклования каучука, тем ниже уровень масло- и топливостойкости резин на его основе [25–35]. Из российских бутадиен-нитрильных каучуков наилучшую морозостойкость имеют каучуки марки СКН-18 и внедренный после 1990 г. каучук марки БНКС-18. Ранее сополимеризацию бутадиена и нитрила акриловой кислоты проводили на бионеразлагаемых некалевых эмульгаторах. С повышением требований в области экологии возникла необходимость замены бионеразлагаемых эмульгаторов на биоразлагаемые. После комплексных исследований новых марок резин на основе парафинатных каучуков выяснилось, что уровень морозостойкости данных резин по сравнению с резинами на основе сульфонатных и алкилсульфонатных каучуков снижается. Указанное явление связано не с ухудшением низкотемпературных свойств самого каучука, а с изменением его молекулярной структуры, формируемой в процессе эмульсионной сополимеризации, что приводит к изменению системы поперечных связей, образующихся в процессе вулканизации [36–45]. Резины с серной вулканизирующей системой обладают лучшей морозостойкостью благодаря подвижности связей различной степени сульфидности. Применение пероксидной вулканизирующей системы совместно с триаллилизотиоциануратом облегчает подвижность углерод-углеродных связей. Введение пластификаторов является эффективным способом повышения морозостойкости БНК. Это связано с тем, что эмульгатор действует аналогично поверхностно-активным веществам и изменяет распределение ингредиентов в смеси. В зависимости от дозировки и химического строения пластификатора минимальная температура эксплуатации резин на основе БНК составляет: для каучука марок СКН-18 и БНКС-18 – от –45 до –55 °С; для марок СКН-26 и БНКС-26 – от –40 до –50 °С; для марок СКН-40 и БНКС-40 – от –10 до –30 °С. Наиболее морозостойкими резинами на основе БНК, работоспособными на воздухе до температуры –55 °С, являются серийные резины следующих марок: В-14-1, 7-В-14-1, 7130, 7-7130, 51-1666-2, ИРП-1353, ИРП-1352, 51-1668, 51-1683, 98-1, 4326-1 НТА, 57-037, ИРП-1078.

При изготовлении уплотнительных деталей специального назначения перспективное использование имеют резины на основе гидрированного бутадиен-нитрильного каучука (ГБНК). Гидрирование каучука за счет насыщения двойных связей позволяет улучшить практически все основные эксплуатационные свойства резин уплотнительного назначения: прочностные характеристики, масло- и износостойкость [46–51].

Большой технологической проблемой являлось гидрирование каучуков с малым содержанием нитрилакриловой кислоты, что сдерживало их применение для изготовления морозостойких уплотнений. В настоящее время эта проблема решена благодаря совершенствованию технологии синтеза. Кроме того, несмотря на высокую стоимость каучуков, исследование и разработка резин на их основе является актуальной задачей в отраслях специального назначения, что дает возможность производить серийные морозо- и топливостойкие резины с уникальным комплексом свойств.

### **Резины на основе неполярных каучуков общего назначения**

Ассортимент каучуков, которые способствуют обеспечению устойчивой работы резин и деталей из них при температурах от  $-50$  до  $-60$  °С, крайне ограничен. Резины на основе неполярных каучуков обладают высокими подвижностью и гибкостью макромолекул. К ним относятся полимеры диенового ряда, недостатком которых вследствие наличия двойной связи в основной цепи полимера является склонность к термоокислительному старению. В настоящее время некристаллизующийся каучук марки СКМС-10 является самым морозостойким промышленным каучуком. Резины на его основе работоспособны при температурах до  $-70$  °С, однако их применение сдерживают неудовлетворительные технологические свойства данного каучука при переработке ввиду его жесткости, что приводит к повышению энергетических затрат при смешении. Бутадиен-стирольный каучук растворной полимеризации марки ДССК-18 является некристаллизующимся, что обеспечивает высокую морозостойкость. В процессе его переработки исключается стадия термопластикации, характерная для таких каучуков других марок. Следует отметить, что промышленный выпуск бутадиен-стирольных каучуков растворной полимеризации в России в настоящее время осуществляется в малых объемах.

Кроме того, необходимо учитывать, что применение резин на основе неполярных каучуков общего назначения в авиакосмической отрасли ограничено ввиду малой стойкости к атмосферному и озонному старению, а также вследствие высокой непереносимости.

### **Резины на основе этиленпропиленовых каучуков**

Этиленпропиленовые каучуки – это продукт сополимеризации этилена и пропилена. Они представляют особый интерес для авиации, так как практически не содержат двойных связей и вследствие этого являются стойкими к старению. Двойные сополимеры этилена и пропилена обозначаются СКЭП. Они вулканизируются преимущественно пероксидами. Для повышения скорости вулканизации в основную цепь добавляют мономеры диенового ряда. Обычно для этой цели используют дициклопентадиен и этилиденнорборнен. Наличие несопряженных диенов позволяет проводить серную вулканизацию. Тройные сополимеры обозначаются СКЭПТ. Морозостойкость резин на основе каучуков марки СКЭПТ определяется происходящим при воздействии отрицательных температур образованием регулярной молекулярной и надмолекулярной структур каучука вследствие его кристаллизации и микрокристаллизации при указанном воздействии. Кристаллизация этиленпропиленовых каучуков замедляется с увеличением содержания пропиленовых звеньев в цепи сополимера. Поэтому наиболее морозостойкими являются каучуки марки СКЭП-60. При разработке рецептур морозостойких резин на основе этиленпропиленовых каучуков рекомендуют использовать каучуки с высоким содержанием звеньев пропилена и невысокой молекулярной массой для обеспечения подвижности цепи полимера. В качестве пластификаторов резин на основе двойных и тройных этиленпропиленовых каучуков применяют предельные углеводороды –

например, масла на основе парафина. Зарубежные производители выпускают этиленпропиленовые каучуки, наполненные минеральным маслом на стадии синтеза. Это позволяет облегчить их переработку при изготовлении резиновых смесей. В эластомерных композициях на основе двойных и тройных этиленпропиленов в качестве регуляторов морозостойкости применяют так называемые вулканизирующие пластификаторы, которые состоят из полибутадиеновых олигомеров, отличающихся высоким содержанием производных винила и отсутствием функциональных концевых групп. Резины на основе двойных и тройных этиленпропиленовых каучуков, такие как ИРП-1375, ИРП-1376, ИРП-1377, 51-1481, 51-1524, 51-5015, ПС-04, 57-7018, 9123, 6235, 2682 и 18-429, работоспособны на воздухе в диапазоне температур от  $-50$  до  $+150$  °С.

### **Новые разработки НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в области резин на основе этиленпропиленовых каучуков**

Основной проблемой уплотнительных резин авиационного назначения, работающих в контакте с воздухом, является преждевременный выход деталей из строя вследствие активно проходящих процессов термического и озонного старения. Для решения указанной проблемы требуется разработка новых резин. В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ проведены комплексные исследования резин на основе различных каучуков. В качестве полимерной основы исследованы каучуки с высокой стойкостью к старению – это каучуки типов СКЭП и СКЭПТ, а также силоксановые и пропиленоксидные каучуки (типа СКПО) [17–21].

Особый интерес в этой связи представляют каучуки типов СКЭП и СКЭПТ как полимеры, обладающие морозо- и озоностойкостью, а также широким температурным диапазоном эксплуатации.

По результатам ранее проведенных исследований разработаны две типовые рецептуры морозостойких резиновых смесей с повышенной стойкостью к тепловому и озонному старению.

В качестве основы морозостойкой композиции, стойкой к озонному и тепловому старению, в базовую рецептуру 1 вошел этиленпропиленовый каучук, а в базовую рецептуру 2 – пропиленоксидный каучук. Выбор указанных каучуков связан с их доступной стоимостью, простотой переработки, высокими техническими характеристиками и возможностью совмещения. Для повышения эластичности при низких температурах в состав, наряду с активным углеродным наполнителем, введен малоактивный технический углерод. Для повышения морозостойкости, а также с учетом особенностей вулканизации этиленпропиленовых и пропиленоксидных каучуков применен нестандартный прием. Известно, что пероксидная вулканизация дает термостойкие С–С-связи, однако вследствие их малой подвижности они снижают морозостойкость резин. Подвижные моно-, ди- и полисульфидные связи улучшают морозостойкость, но имеют малую теплостойкость ввиду малой энергии связи. Для ликвидации указанных противоречий применена комбинированная серно-перекисная вулканизирующая система. Наличие двух областей поперечного сшивания при вулканизации позволило создать структуру с подвижными связями.

Проведенные эксперименты показали, что резина на основе этиленпропиленового каучука с комбинированной вулканизирующей системой имеет сбалансированные технические характеристики. Озоностойкость резины, определенная по ГОСТ 9.026–74, составляла 100 ч без разрушений, а коэффициент морозостойкости по эластическому восстановлению по ГОСТ 9.026–74 при температуре  $-60$  °С: 0,22–0,24.

Резине присвоена марка ВР-43. Разработаны ТУ 1-595-28-1934-2–2021 «Морозостойкая резиновая смесь марки ВР-43».

### Заключения

Разработка морозостойких резин – сложная и многогранная проблема, требующая решения в ближайшее время в связи с интенсификацией работы авиационной техники, что позволит обеспечить высокую работоспособность машин и механизмов в целом в экстремальных арктических условиях. Предложены пути направленного создания резин для работы в условиях низких температур.

Описаны основные пути направленного регулирования основных технических характеристик резин на основе каучуков различного химического строения.

Основные варианты модификации состава топливостойких резин на основе БНК следующие:

- использование в качестве наполнителей для топливостойких резин технического углерода различной дисперсности и структурности марок П-324, П-514, П-803, Т-900 и N-774, включая их комбинации, а также белой сажи марки БС-120;

- применение для топливостойких резин различных типов вулканизирующих систем: вулканизации серой с ускорителями – сульфенамидами, тиурамами, тиазолами; вулканизации органическими пероксидами дикумила и дитретбутила для повышения теплоустойчивости резин, а также использование комбинированных серно-перекисных систем;

- применение для топливостойких резин в качестве полимерной основы различных марок каучуков специального назначения. Наиболее часто используется комбинация из двух и более БНК с различным содержанием нитрила акриловой кислоты;

- модификация топливостойкой резиновой смеси каучуками общего назначения (например, марок СКД, СКИ и СКМС) для улучшения морозостойкости резины без снижения уровня топливо- и маслостойкости;

- добавление поливинилхлорида в резиновую смесь на основе БНК для повышения морозостойкости;

- снижение дозировок или полный отказ от введения пластификаторов, таких как дибутилфталат и дибутилсебацат, для повышения эластичности и морозостойкости.

Основные тенденции для морозостойких резин на основе неполярных каучуков следующие:

- в качестве основы морозостойкой резины предложены полимерные материалы с низкими температурами стеклования и/или порогами кристаллизации: полисилоксаны, фторполимеры, диеновые каучуки, этиленпропиленовые, этиленпропилендиеновые эластомеры, пропиленоксидные и эпихлоргидриновые каучуки;

- озоностойкость резины обеспечивается использованием полимерной матрицы с низкой непредельностью таких базовых каучуков, как этиленпропиленовые, этиленпропилендиеновые и пропиленоксидные, или добавлением в резиновую смесь антиоксидантов;

- для повышения эластичности сшитого эластомера при низких температурах применяется технический углерод пониженной активности;

- для обеспечения сочетания морозо- и теплостойкости необходимо применение комбинированных вулканизирующих систем.

Комплексные подходы к созданию рецептур морозостойких резин, предложенные в данном исследовании, позволяют направленно регулировать свойства резин с учетом характера работы деталей из них. Нестандартные подходы, примененные при разработке новых резин, способствуют расширению массового ассортимента уплотнительных резин, а при необходимости достижения длительной работоспособности дают возможность заменить соответствующие марки.

## Список источников

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Роль химии в создании материалов нового поколения для сложных технических систем // *Тез. докл. XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии: в 5 т.* Екатеринбург: УрО РАН, 2016. Т. 3. С. 25–26.
3. Каблов Е.Н. Шестой технологический уклад // *Наука и жизнь*. 2010. № 4. С. 2–7.
4. История авиационного материаловедения. ВИАМ – 80 лет: годы и люди / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2012. С. 346–348.
5. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение // *Все материалы*. Энциклопедический справочник. 2008. № 3. С. 2–14.
6. Большой справочник резинщика: в 2 ч. М.: Техинформ, 2012. 1385 с.
7. Технология резины: Рецептуростроение и испытания: пер. с англ. / под ред. Дж.С. Дика. СПб.: Научные основы и технологии, 2010. 620 с.
8. Федюкин Д.П., Махлис Ф.А. Технические и технологические свойства резин. М.: Химия, 1985. 240 с.
9. Махлис Ф.А., Федюкин Д.Л. Терминологический справочник по резине. М.: Химия, 1989. 400 с.
10. Корнев А.Е., Буканов А.М., Шевердяев О.Н. Технология эластомерных материалов. М.: Истек, 2009. 502 с.
11. Агаянц И.М. Пять столетий каучука и резины. М.: Модерн-А, 2002. 432 с.
12. Кошелев Ф.Ф., Корнев А.Е., Буканов А.М. Общая технология резины. 4-е изд. М.: Химия, 1978. 528 с.
13. Осошник И.А., Шутилин Ю.Ф., Карманова О.В. Производство резиновых технических изделий. Воронеж: Воронеж. гос. технол. акад., 2007. 972 с.
14. Гришин Б.С. Материалы резиновой промышленности (информационно-аналитическая база данных): в 2 т. Казань: Изд-во КГТУ, 2010. Т. 1. 596 с.
15. Каучук и резина. Наука и технология / под ред. Дж. Марка, Б. Эрмана, Ф. Эйрича; пер. с англ. под ред. А.А. Берлина, Ю.Л. Морозова. Долгопрудный: Интеллект, 2011. 768 с.
16. Нудельман З.Н. Фторкаучуки: основы, переработка, применение. М.: РИАС, 2007. 383 с.
17. Семенова С.Н., Чайкун А.М., Сулейманов Р.Р. Этиленпропилендиеновый каучук и его применение в резинотехнических материалах специального назначения (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 3 (56). С. 23–30. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-23-30.
18. Семенова С.Н., Сулейманов Р.Р., Чайкун А.М. Совместное использование этиленпропилендиенового и метилфенилсилоксанового каучуков в рецептуре морозостойкой и озоностойкой резины // *Труды ВИАМ*. 2019. № 9 (81). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.06.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-9-64-72.
19. Каблов Е.Н., Семенова С.Н., Сулейманов Р.Р., Чайкун А.М. Перспективы применения этиленпропилендиенового каучука в составе морозостойкой резины // *Труды ВИАМ*. 2019. № 12 (84). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.06.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-29-36.
20. Семенова С.Н., Чайкун А.М., Сулейманов Р.Р. Влияние вулканизирующей системы на температурные свойства резины на основе этиленпропиленового каучука // *Каучук и резина*. 2020. Т. 79. № 4. С. 210–213.
21. Семенова С.Н., Чайкун А.М. Силиконовые резиновые композиции с повышенной термостойкостью (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2020. № 11 (93). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.06.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-11-31-37.
22. Чайкун А.М., Елисеев О.А., Наумов И.С., Венедиктова М.А. Особенности построения рецептур для морозостойких резин // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. № 3. С. 53–55.

23. Нормы летной годности самолетов транспортной категории: АП-25: утв. Постановлением 28-й сессии Совета по авиации и использованию воздушного пространства 11.12.2008. 3-е изд. с поправками 1–6. М.: Авиаиздат, 2009. 267 с.
24. Ефимов В.А., Шведкова А.К., Коренькова Т.Г., Кириллов В.Н. Исследование полимерных конструкционных материалов при воздействии климатических факторов и нагрузок в лабораторных и натуральных условиях // Труды ВИАМ. 2013. № 1. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.06.2022).
25. Каблов Е.Н., Кондрашов С.В., Юрков Г.Ю. Перспективы использования углеродсодержащих наночастиц в связующих для полимерных композиционных материалов // Российские нанотехнологии. 2013. Т. 8. № 3–4. С. 24–42.
26. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. III. Значимые факторы старения // Деформация и разрушение материалов. 2011. № 1. С. 34–40.
27. Земский Д.Н., Чиркова Ю.Н. Новые ингредиенты резиновых смесей // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16. № 12. С. 143–145.
28. Композиционный маслобензостойкий износоморозостойкий материал: пат. 2437903 Рос. Федерация; заявл. 14.04.08; опубл. 27.12.11.
29. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 7–17.
30. Елисеев О.А., Краснов Л.Л., Зайцева Е.И., Савенкова А.В. Переработка и модифицирование эластомерных материалов во всеклиматических условиях // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 309–314.
31. Чайкун А.М., Елисеев О.А., Наумов И.С., Венедиктова М.А. Особенности морозостойких резин на основе различных каучуков // Труды ВИАМ. 2013. № 12. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.06.2022).
32. Ерасов В.С., Котова Е.А. Эрозионная стойкость авиационных материалов к воздействию твердых (пылевых) частиц // Авиационные материалы и технологии. 2011. № 3. С. 30–36.
33. Каблов Е.Н. Химия в авиационном материаловедении // Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. № 1. С. 3–4.
34. Черский И.Н., Попов С.Н., Гольдштрах И.З. Проектирование и расчет морозостойких подвижных уплотнений. Новосибирск: Наука, 1992. 123 с.
35. Технология резины: Рецептуростроение и испытания / под ред. Дж.С. Дика; пер. с англ. под ред. В.А. Шершнева. СПб.: Научные основы и технологии, 2010. 620 с.
36. Каргин В.А. Энциклопедия полимеров: в 3 т. М.: Советская Энциклопедия, 1972. Т. 1: А–К. 609 с.
37. Петрова Н.Н., Портнягина В.В., Федотова Е.С. Перспективы применения нового пластификатора дибутоксиэтиладипината для производства резин уплотнительного назначения с повышенной морозостойкостью // Каучук и резина. 2008. № 2. С. 18–22.
38. Портнягина В.В., Соколова М.Д., Петрова Н.Н. и др. Модификация резин природными цеолитами при создании морозостойких уплотнений горнодобывающей техники Севера // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012. № 11. С. 392–401.
39. Соколова М.Д., Давыдова М.Л., Шадрин Н.В., Морозова Л.Я. Разработка эластомерных нанокompозитов уплотнительного назначения для техники Севера // Известия Самарского научного центра РАН. 2011. Т. 13. № 1(2). С. 397–401.
40. Износостойкая смесь на основе пропиленоксидного каучука: пат. 2294346 Рос. Федерация; заявл. 20.05.05; опубл. 27.02.07.
41. Цеолитосодержащая морозостойкая резиновая смесь: пат. 2326903 Рос. Федерация; заявл. 31.08.06; опубл. 20.06.08.
42. Резиновая смесь, модифицированная композицией сверхвысокомолекулярного полиэтилена и наношпинели магния: пат. 2425851 Рос. Федерация; заявл. 09.03.11; опубл. 10.08.11.
43. Савельев А.В., Внукова В.Г. Влияние наполнителей на адгезионную прочность несовместимых полимеров // Каучук и резина. 1986. № 9. С. 31.

44. Заикин А.Е., Галиханов М.Ф., Архиреев В.П. Влияние наполнителя на термодинамическую устойчивость смесей полимеров // Высокомолекулярные соединения. Сер.: Б. 1997. Т. 39. № 6. С. 1060–1063.
45. Давыдова М.Л., Соколова М.Д. Перспективный технологический способ получения полимерэластомерного материала // Вопросы материаловедения. 2013. № 3 (75). С. 41–47.
46. Shadrinov N.V., Sokolova M.D., Okhlopko A.A. et al. Enhancement of compatibility between ultrahigh-Molecular-Weight polyethylene particles and butadiene-Nitrile rubber matrix with nanoscale ceramic particles and characterization of evolving layer // Bulletin of the Korean Chemical Society. 2013. Vol. 34. No. 12. P. 3762–3766.
47. Шадринов Н.В., Соколова Д.Д. Исследование влияния активированного цеолита на деформацию полимерэластомерных композитов методом атомно-силовой микроскопии // Материаловедение. 2014. № 7. С. 17–22.
48. Портнягина В.В., Петрова Н.Н., Сибирякова Е.М. Исследование влияния бентонитов на структуру и свойства резин на основе пропиленоксидного каучука // Сб. трудов IV Евразийского симп. по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата. Якутск, 2008. 1 электрон. опт. диск.
49. Морозостойкая резиновая смесь на основе пропиленоксидного каучука: пат. 2294341 Рос. Федерация; заявл. 20.05.05; опубл. 27.02.07.
50. Лысова Г.А., Донцов А.А. Гидрированные бутадиен-нитрильные каучуки. Свойства. Рецептуростроение. Применение: тематический обзор. М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1991. 58 с.
51. Анисимов Б.Ю., Дыкман А.С., Имянитов Н.С., Поляков С.А. Гидрирование бутадиен-нитрильных каучуков // Каучук и резина. 2007. № 2. С. 32.

#### References

1. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Kablov E.N. The role of chemistry in the creation of new generation materials for complex technical systems. *Reports of XX Mendeleevsky Congress for General and Applied Chemistry*: in 5 vols. Ekaterinburg: UB of RAS, 2016, vol. 3, pp. 25–26.
3. Kablov E.N. The sixth technological way. *Nauka i zhizn*, 2010, no. 4, pp. 2–7.
4. *History of aviation materials science. VIAM – 80 years: years and people*. Ed. E.N. Kablov. M.: VIAM, 2012, pp. 346–348.
5. Kablov E.N. Aerospace materials science. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2008, no. 3, pp. 2–14.
6. *The Big Reference Book for Specialist in Rubbers*: in 2 parts. Moscow: Tekhinform, 2012. 1385 p.
7. *Technology of rubber: recipe and testing*: trans. from Engl. Ed. J.S. Dik. St. Petersburg: Scientific foundations and technologies, 2010, 620 p.
8. Fedyukin D.P., Makhlis F.A. *Technical and technological properties of razin*. Moscow: Khimiya, 1985, 240 p.
9. Makhlis F.A., Fedyukin D.L. *Terminological reference for rubber*. Moscow: Khimiya, 1989, 400 p.
10. Kornev A.E., Bukanov A.M., Sheverdaev O.N. *Technology of elastomeric materials*. Moscow: East, 2009, 502 p.
11. Agayants I.M. *Five centuries of rubber and rubber*. Moscow: Modern-A, 2002, 432 p.
12. Koshelev F.F., Kornev A.E., Bukanov A.M. *General technology of rubber*. 4th ed. Moscow: Khimiya, 1978, 528 p.
13. Ososhnik I.A., Shutilin Yu.F., Karmanova O.V. *Production of rubber technical products*. Voronezh: Voronezh State Technology Academy, 2007, 972 p.
14. Grishin B.S. *Materials of the rubber industry (information and analytical database)*: in 2 vols. Kazan: KSTU, 2010, vol. 1, 596 p.
15. *Rubber and resin. Science and technology*. Ed. J. Mark, B. Erman, F. Eirich; trans. from English. Ed. A.A. Berlin, Yu.L. Morozova. Dolgoprudny: Intelligence, 2011, 768 p.
16. Nudelman Z.N. *Poftorcacus: basics, processing, application*. Moscow: RIAS, 2007, 383 p.

17. Semenova S.N., Chaykun A.M., Suleymanov R.R. Ethylene-propylene-diene rubber and its use in rubber materials for special purposes (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 3 (56), pp. 23–30. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-23-30.
18. Semenova S.N., Suleymanov R.R., Chaykun A.M. Mixing ethylene-propylene-diene and methylphenylsiloxane rubbers in the formulation of cold and ozone resistant rubber. *Trudy VIAM*, 2019, no. 9 (81), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 14, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-9-64-72.
19. Shuldeshov E.M. Sound-proof properties of aviation heatsound-proof materials. *Trudy VIAM*, 2019, no. 12 (84), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 14, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-37-45.
20. Semenova S.N., Chaikun A.M., Suleimanov R.R. The influence of the vulcanizing system on the temperature properties of rubber based on ethylenepropylene rubber. *Kauchuk i rezina*, 2020, vol. 79, no. 4, pp. 210–213.
21. Semenova S.N., Chaykun A.M. Highly heat-resistant silicone rubber compositions (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 11 (93), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 14, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-11-31-37.
22. Chaykun A.M., Eliseev O.A., Naumov I.S., Venediktova M.A. Compounding principles in the field of frost resistant rubbers. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2013, no. 3, pp. 53–55.
23. *The norms of flight fit of the transport category aircraft: AP-25: approved by a resolution of the 28th session of the Council for Aviation and the use of airspace on 11.12.2008*. 3rd ed. with amendments 1–6. Moscow: Aviazdat, 2009, 267 p.
24. Efimov V.A., Shvedkova A.K., Korenkova T.G., Kirillov V.N. Research of polymeric constructional materials at influence of climatic factors and loadings in laboratory and natural conditions. *Trudy VIAM*, 2013, no. 1, paper no. 05. Available at: <http://viam-works.ru> (accessed: June 14, 2022).
25. Kablov E.N., Kondrashov S.V., Yurkov G.Yu. Prospects for the use of carbon-containing nanoparticles in binders for polymer composite materials. *Rossiyskiye nanotekhnologii*, 2013, vol. 8, no. 3-4, pp. 24–42.
26. Kablov E.N., Startsev O.V., Krotov A.S., Kirillov V.N. Climate aging of composite aviation materials. III. Significant aging factors. *Deformatsiya i razrusheniye materialov*, 2011, no. 1, pp. 34–40.
27. Zemsky D.N., Chirkova Yu.N. New ingredients of rubber mixtures. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2013, vol. 16, no. 12, pp. 143–145.
28. *Compositional oil- and gas-resistant, frozen-resistant material*: pat. 2437903 Rus. Federation; filed 114.04.08; publ. 27.12.11.
29. Kablov E.N. The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period to 2030. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. S, pp. 7–17.
30. Eliseev O.A., Krasnov L.L., Zajceva E.I., Savenkova A.V. Development and modifying of elastomeric materials for application in all weather conditions. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. S, pp. 309–314.
31. Chaikun A.M., Eliseev O.A., Naumov I.S., Venediktova M.A. Features of old-resistant rubbers on the basis on different unvulcanized rubbers. *Trudy VIAM*, no. 12, paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 14, 2022).
32. Erasov V.S., Kotova E.A. Erosion resistance of aviation materials to influence of solid (dust) particles. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2011, no. 3, pp. 30–36.
33. Kablov E.N. Chemistry in aviation material science. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*, 2010, vol. LIV, no. 1, pp. 3–4.
34. Chernsky I.N., Popov S.N., Goldstrakh I.Z. *Design and calculation of frost-resistant mobile seals*. Novosibirsk: Nauka, 1992, 123 p.
35. *Technology of rubber: recipe and testing*. Ed. J.S. Savage; trans. from English. Ed. V.A. Shershnev. St. Petersburg: Scientific foundations and technologies, 2010, 620 p.
36. Kargin V.A. *Encyclopedia of polymers*: in 3 vols. Moscow: Sovetskaya Entsiklopediya, 1972, vol. 1: A–K, 609 p.

37. Petrova N.N., Portnyagina V.V., Fedotova E.S. The prospects for the use of a new plasticizer of diboxyladipinate for the production of rubberous intelligence with increased frost resistance. *Kauchuk i rezina*, 2008, no. 2, pp. 18–22.
38. Portnyagina V.V., Sokolova M.D., Petrova N.N. et al. Modification of rubberizes by natural zeolites when creating frost-resistant seals of the mining technique of the North. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2012, no. 11, pp. 392–401.
39. Sokolova M.D., Davydova M.L., Shadrinov N.V., Morova L.Ya. Development of elastomeric nanocomposites for sealing for the technique of the North. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2011, vol. 13, no. 1 (2), pp. 397–401.
40. *Wound-resistant mixture based on propylene radiation rubber*: pat. 2294346 Rus. Federation; filed 20.05.05; publ. 27.02.07.
41. *Tseolithic frost -resistant rubber mixture*: pat. 2326903 Rus. Federation; filed 31.08.06; publ. 20.06.08.
42. *A rubber mixture modified by the composition of super-molecular weight polyethylene and magnesium nanoshpinel*: pat. 2425851 Rus. Federation; filed 09.03.11; publ. 10.08.11.
43. Savelyev A.V., Vrukova V.G. The effect of fillers on adhesive strength of incompatible polymers. *Kauchuk i rezina*, 1986, no. 9, p. 31.
44. Zaikin A.E., Galikhanov M.F., Archireev V.P. The effect of the filler on the thermodynamic stability of polymer mixtures. *Vysokomolekulyarnyye soyedineniya*, Ser.: B, 1997, vol. 39, no. 6, pp. 1060–1063.
45. Davydova M.L., Sokolova M.D. A promising technological method for obtaining polymer – elastomeric material. *Voprosy materialovedeniya*, 2013, no. 3 (75), pp. 41–47.
46. Shadrinov N.V., Sokolova M.D., Okhlopko A.A. et al. Enhancement of compatibility between ultrahigh-Molecular-Weight polyethylene particles and butadiene-Nitrile rubber matrix with nanoscale ceramic particles and characterization of evolving layer. *Bulletin of the Korean Chemical Society*, 2013, vol. 34, no. 12, pp. 3762–3766.
47. Shadrinov N.V., Sokolova D.D. A study of the influence of activated zeolite on the deformation of polymer-elastomeric composites by the method of atomic-power microscopy. *Materialovedenie*, 2014, no. 7, pp. 17–22.
48. Portnyagina V.V., Petrova N.N., Sibiryakova E.M. Study of the influence of bentonites on the structure and properties of razin based on propylenoxide rubber. *Works of the IV Eurasian Symposium on the problems of the strength of materials and machines for the regions of the cold climate*. Yakutsk, 2008, 1 CD.
49. *Frost-resistant rubber mixture based on propylenitic rubber*: pat. 2294341 Rus. Federation; filed 20.05.05; publ. 27.02.07.
50. Lysova G.A., Dontsov A.A. *Hydrated butadien-nitrile rubber. Properties. Recipe. Application*: thematic review. Moscow: TsNIITEneftekhim, 1991, 58 p.
51. Anisimov B.Yu., Dukman A.S., Namnitov N.S., Polyakov S.A. Hydration of butadien-nitrile rubber. *Kauchuk i rezina*, 2007, no. 2, p. 32.

#### Информация об авторах

**Вахрушева Яна Андреевна**, начальник Научно-исследовательского отделения, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Юмашев Олег Борисович**, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Чайкун Александр Михайлович**, заместитель начальника лаборатории по науке, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

#### Information about the authors

**Jana A. Vahrusheva**, Head of Scientific-Research Bureau, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Oleg B. Yumashev**, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Alexander M. Chaykun**, Deputy Head of Laboratory of Science, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 20.06.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 05.07.2022.

The article was submitted 20.06.2022; approved and accepted for publication after reviewing 05.07.2022.